

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

---



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 103 06 668.3

**Anmeldetag:** 13. Februar 2003

**Anmelder/Inhaber:** XTREME technologies GmbH, Jena/DE

**Bezeichnung:** Anordnung zur Erzeugung von intensiver  
kurzwelliger Strahlung auf Basis eines Plasmas

**IPC:** H 05 G 2/00

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der  
ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 7. November 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Schmidt C.

Anordnung zur Erzeugung von intensiver kurzwelliger Strahlung auf Basis eines Plasmas

- Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Erzeugung von intensiver kurzwelliger Strahlung auf Basis eines Plasmas, wobei in der Vakuumkammer eine energiereiche Anregungsstrahlung auf einen Targetstrom gerichtet ist, die mittels einer definierten Impulsenergie den Targetstrom abschnittsweise vollständig in ein dichtes heißes Plasma umgewandelt, das insbesondere kurzwellige Strahlung im Extrem-  
Ultravioletten (EUV), d.h. im Wellenlängenbereich von 1 nm bis 20 nm, emittiert.
- Die Erfindung findet Anwendung als Lichtquelle kurzwelliger Strahlung, vorzugsweise für die EUV-Lithographie bei der Herstellung integrierter Schaltkreise. Sie kann aber auch für inkohärente Lichtquellen in anderen Spektralbereichen vom weichen Röntgen- bis in den infraroten Spektralbereich genutzt werden.
- Für die Herstellung immer schnellerer integrierter Schaltkreise ist es notwendig, dass die Breite der einzelnen Struktur auf dem Chip immer kleiner wird. Da die Auflösung bei optischen Verfahren (optische Lithographie) proportional zur Wellenlänge des verwendeten Lichts ist, geht die Entwicklung zu immer kürzeren Wellenlängen. Ein Gebiet mit sehr guten Zukunftsaussichten ist die EUV-Lithographie (Wellenlänge um 13,5 nm).
- Um wirtschaftlich zu sein, muss ein bestimmter Durchsatz an Wafern gewährleistet werden, was bei einer bestimmten Effizienz der abbildenden Optiken eine Lichtquelle mit einer großen Mindestleistung notwendig macht. Im Wellenlängenbereich um 13,5 nm existieren derzeit keine Lichtquellen, die in der Lage wären, die geforderten Leistungen zu Verfügung zu stellen. Auch die Auswahl an Lichtquellen, die potentiell dazu in der Lage sein könnten, ist sehr begrenzt.
- Als aussichtsreiche Strahlungsquellen für die EUV-Lithographie kommen nach dem heutigen Wissensstand laserproduzierte Plasmen, Entladungsplasmen und Synchrotrons in Betracht. Die Quellen auf Basis eines Plasmas haben dabei den Vorteil, dass sie relativ problemlos in den vorhandenen Produktionsprozess einbezogen werden können.

Um insbesondere bei laserproduzierten Plasmen eine unerwünschte Teilchenemission, die die Lebensdauer vor allem der ersten Optik stark reduziert, einzuschränken, wurden sogenannte „massenlimitierte“ Targets entwickelt. Diese schränken die Menge des produzierten Debris wesentlich ein. Massenlimitiert bedeutet dabei, dass

5 das zur Verfügung stehende Targetmaterial durch die Wechselwirkung mit dem Energiestrahл vollständig in Plasma verwandelt wird. Da somit die Menge des Materials, das zur Strahlungserzeugung zur Verfügung steht, begrenzt ist, ergibt sich genau eine Energiemenge des Strahlungsimpulses für eine optimale Konversion von z.B. Laserphotonen in EUV-Photonen. Damit wiederum steht bei einer gegebenen

10 Impulsfolgefrequenz des Energiestrahls die mittlere einkoppelbare Leistung und mit einer bestimmten Konversionseffizienz auch die maximale erzeugbare EUV-Leistung fest. Die maximale Impulsfolgefrequenz des Energiestrahls ergibt sich dadurch, dass das Target durch die Plasmaerzeugung gestört wird und deshalb ein minimaler zeitlicher Abstand der einzelnen Laserimpulse notwendig ist, der von der

15 Transportgeschwindigkeit des Targetstroms abhängt.

Bisher vorgeschlagene Targetkonzepte sind:

- ein kontinuierlicher Materialstrahl (sogenannter Target-Jet) z.B. aus kondensiertem Xenon (z.B. gemäß WO 97/40650 A1),
- 20 - ein dichter Tröpfchen-Nebel aus mikroskopisch kleinen Tropfen (z.B. WO 01/30122 A1),
- Cluster-Targets (z.B. nach US 5,577,092),
- makroskopische Tropfen (z.B. gemäß EP 0 186 491 B1) und
- Eiskristalle durch Anwendung eines Spray (US 6,324,256).

25 Allen bekannten Targetkonzepten ist gemeinsam, dass die Menge an Material, das für einen Anregungsimpuls zur Verfügung steht, gering ist, so dass die maximale Energie des Einzelimpulses begrenzt ist. Die Transportgeschwindigkeit des Targetmaterials und der Durchmesser des Targetstrahls lässt sich aus physikalischen Gründen (Hydrodynamik) ebenfalls nicht unbegrenzt erhöhen, wodurch andererseits

30 die Impulsfolgefrequenz des Energiestrahls beschränkt ist. Da die mittlere Leistung das Produkt aus Einzelimpulsenergie und Folgefrequenz des Anregungsstrahls ist, ergibt sich daraus eine obere Grenze für die erzeugbare EUV-Leistung.

Somit ist es mit herkömmlichen Targets nicht möglich, die von der Halbleiterindustrie geforderten hohen durchschnittlichen Leistungen im EUV-Spektralbereich zu erreichen.

- 5 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine neue Möglichkeit zur Erzeugung von aus Plasma generierter Strahlung, insbesondere EUV-Strahlung, zu finden, bei der unter Beibehaltung der Vorteile der Massenlimitierung der Targets die ins Plasma konvertierte Einzelimpuls-Energie und somit die nutzbare Strahlungsleistung deutlich gesteigert wird.

10

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe bei einer Anordnung zur Erzeugung von intensiver Strahlung auf Basis eines Plasmas, die einen Targetgenerator mit einer Düse zur Dosierung und Ausrichtung eines Targetstroms für die Plasmaerzeugung und eine Vakuunkammer enthält, wobei in der Vakuunkammer eine energiereiche

15 Anregungsstrahlung auf den Targetstrom gerichtet ist und der Targetstrom stückweise mittels einer definierten Impulsenergie der Anregungsstrahlung vollständig in ein Plasma, das eine hohe Konversionseffizienz für die intensive Strahlung in einem gewünschten Wellenlängenbereich aufweist, umgewandelt wird, dadurch gelöst, dass die Düse des Targetgenerators eine Mehrkanaldüse mit

20 mehreren separaten Öffnungen ist, wobei die Öffnungen mehrere Targetstrahlen erzeugen, auf die abschnittsweise jeweils gleichzeitig die Anregungsstrahlung zur Plasmaerzeugung gerichtet ist.

25

Vorteilhaft sind die einzelnen Öffnungen der Düse derart angeordnet, dass ein von der Anregungsstrahlung auf alle die Düse verlassenden Targetstrahlen fokussierter Strahlungsfleck räumlich im Wesentlichen gleichmäßig mit parallelen Targetstrahlen abgedeckt ist, wobei alle Targetstrahlen über ihren Durchmesser vollständig bestrahlt sind.

30

Dabei können die einzelnen Öffnungen der Düse zweckmäßig in wenigstens einer Reihe angeordnet sein.

Besonders vorteilhaft im Sinne der Minimierung der Einkoppelverluste der Anregungsstrahlung ist es, wenn die einzelnen Öffnungen der Düse so angeordnet sind, dass die Targetstrahlen den Strahlungsfleck der Anregungsstrahlung lückenlos und nicht überlappend ausfüllen, wobei für im Strahlungsfleck benachbart

erscheinende Targetstrahlen die Öffnungen der Düse zur Richtung der Anregungsstrahlung versetzt angeordnet sind.

Dazu sind die einzelnen Öffnungen der Düse vorzugsweise entlang einer Geraden angeordnet, die mit der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung einen Winkel  
5 zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  einschließt.

In einer weiteren vorteilhaften Gestaltung sind die einzelnen Öffnungen der Düse in mehreren Reihen versetzt zueinander angeordnet.

Dabei können die Öffnungen zweckmäßig als parallele Reihen mit gleichem Abstand der Öffnungen in der Düse vorhanden sein, wobei die Reihen bezüglich der  
10 Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung hintereinander liegen und um einen Bruchteil des Öffnungsabstandes, der von der Anzahl der hintereinander liegenden Reihen abhängt, zueinander versetzt angeordnet sind. Vorzugsweise sind die Öffnungen der Düse in zwei parallelen Reihen angeordnet sind, die orthogonal zur Richtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet und um den halben Öffnungsabstand  
15 zueinander versetzt sind.

In einer anderen geeigneten Ausführung kreuzen die Reihen von Öffnungen einander, wobei einander kreuzende Reihen ihre erste oder letzte Öffnung als gemeinsame Öffnung haben, die deren Schnittpunkt darstellt, und gegenüber der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung unter dem gleichen Schnittwinkel  
20 spiegelsymmetrisch ausgerichtet sind.

Besonders zweckmäßig ist es, wenn zwei einander schneidende Reihen von Öffnungen V-förmig gegenüber der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet sind.

Dabei kann die V-Form einerseits mit der Spitze und andererseits mit der Öffnung in  
25 Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet sein.

Als Anregungsstrahlung für den Energieeintrag in die Targetstrahlen ist vorteilhaft ein beliebiger gepulster Energiestrahл vorgesehen, wobei der Energiestrahл einen Fokus aufweist, dessen Querschnittsfläche die Breite aller nebeneinander angeordneten  
30 Targetstrahlen gleichzeitig überdeckt. Vorzugsweise wird der Energiestrahл durch einen gepulsten Laser erzeugt. Es kann jedoch auch in geeigneter Weise ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Elektronen oder Ionenstrahl, eingesetzt werden.

Ein Energiestrahle in Form eines Laserstrahls wird zweckmäßig durch eine Zylinderoptik zu einer orthogonal zur Richtung der Targetstrahlen ausgerichteten Fokuslinie auf die Targetstrahlen fokussiert.

- 5 In einer anderen Ausführungsvariante kann der Energiestrahle aber auch aus mehreren einzelnen Energiestrahlen zusammengesetzt sein, wobei die Energiestrahlen durch geeignete optische Elemente orthogonal zur Richtung der Targetstrahlen zu einer quasi-kontinuierlichen Fokuslinie aneinandergereiht sind und gleichzeitig auf die Targetstrahlen treffen.

- 10 Für eine weitere zweckmäßige Gestaltung der Plasmaanregung wird der Energiestrahle aus mehreren einzelnen Energiestrahlen zusammengesetzt, wobei die einzelnen Energiestrahlen jeweils auf einen Targetstrahl fokussiert sind und alle Targetstrahlen gleichzeitig bestrahlt werden. Dabei können zur Erzeugung der Reihe von einzelnen Energiestrahlen vorteilhaft ein Laser mit strahlteilenden optischen Elementen oder mehrere synchron betriebene Laser vorgesehen sein.

- 15 In jeder der vorgenannten Anregungsvarianten wird der Energiestrahle hinsichtlich der Effizienz seiner Energieeinkopplung zweckmäßig durch Anwendung von Doppelimpulsen aus Vor- und Hauptimpuls oder Mehrfachimpulsen optimiert.

- 20 Die aus den Öffnungen der Mehrkanaldüse bereitgestellten Targetstrahlen sind im Bereich der Wechselwirkung mit der Anregungsstrahlung vorzugsweise kontinuierliche Flüssigkeitsstrahlen, Flüssigkeitsstrahlen, die spätestens im Bereich der Wechselwirkung mit der Anregungsstrahlung in Tropfenform zerfallen sind, oder Strahlen, die beim Austritt aus der Düse in die Vakuumkammer in den festen Aggregatzustand übergehen.

- 25 Vorzugsweise werden die Targetstrahlen aus kondensiertem Xenon erzeugt. Es sind aber auch Targetstrahlen aus wässriger Lösung von Metallsalzen geeignet.

- Die Anordnung zur Erzeugung von plasmagenerierter Strahlung wird vorteilhaft als Strahlungsquelle in den Wellenlängenbereichen zwischen weicher Röntgenstrahlung und Infrarot-Spektralbereich verwendet. Vorzugsweise wird sie zur Erzeugung von  
30 EUV-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1 und 20 nm für Vorrichtungen für die Halbleiter-Lithographie, insbesondere für die EUV-Lithographie im Bereich um 13,5 nm, angewendet.

Die Erfindung basiert auf der Grundüberlegung, dass insbesondere die in der Halbleiter-Lithographie geforderten Strahlungsleistungen aus einer plasmabasierten Strahlung wegen der Massenlimitierung der Targets und wegen der notwendigen Targetnachführung (Targetstrom) mit der herkömmlichen Targetbereitstellung nicht erreichbar sind. Da die Menge des Materials, das nach Ausstoß aus einer Düse zur Strahlungserzeugung zur Verfügung steht, begrenzt ist und sich die Targetgröße nicht beliebig steigern lässt, ist nur eine beschränkte Energiemenge der Anregungsstrahlung optimal in Plasma, das die gewünschte Strahlung emittiert, konvertierbar.

Diese scheinbar unüberwindliche Schranke der begrenzten Energiekonversion wird erfindungsgemäß durch Gestaltung einer Düse mit mehreren Einzelöffnungen durchbrochen, indem eine Steigerung der Einkopplungseffizienz der Anregungsenergie in Plasma und zugleich eine Minimierung von Transmissionsverlusten erreicht werden. Die Düse enthält mehrere Kanäle, die dazu dienen, mehrere einzelne Targetstrahlen in einer Wechselwirkungskammer (Vakuumkammer) zu erzeugen und diese gleichzeitig mit energiereicher Anregungsstrahlung (z.B. Laserstrahl, Elektronenstrahl etc.) zu bestrahlen, um ein räumlich ausgedehntes, homogenes Plasma zu erzeugen.

Mit der erfindungsgemäßen Anordnung ist es möglich, aus Plasma generierte Strahlung, insbesondere EUV-Strahlung, mit hoher durchschnittlicher Leistung zu erzeugen, bei der trotz Massenlimitierung der Targets die ins Plasma einkoppelbare Einzelimpuls-Energie und somit die nutzbare Strahlungsleistung deutlich erhöht ist.

Die Erfindung soll nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert werden. Die Zeichnungen zeigen:

Fig. 1: den Prinzipaufbau der erfindungsgemäßen Anordnung mit einer Mehrkanaldüse zur Erzeugung von mehreren parallelen Targetstrahlen, die bezüglich der Anregungsstrahlung räumlich versetzt und auf Lücke angeordnet sind,

Fig. 2a-d: vier Draufsichten auf erfindungsgemäße Mehrkanaldüsen zur Erzeugung von parallelen Targetstrahlen, die bezüglich der Richtung der Anregungsstrahlung zueinander versetzt, hintereinander auf Lücke angeordnet sind und bei minimalem Transmissionsverlust an

Anregungsstrahlung größere Abstände der Kanäle innerhalb der Düse ermöglichen,

Fig. 3: eine perspektivische Ansicht einer Mehrkanaldüse mit in mehreren Reihen zueinander versetzt angeordneten Öffnungen; bei der alle Targetstrahlen mit einem Energiestrahл großen Durchmessers angeregt werden,

Fig. 4: eine Draufsicht auf die Austrittsseite einer erfindungsgemäßen Mehrkanaldüse mit mehreren parallelen Reihen von Öffnungen (Kanälen), bei der ein anregender Energiestrahл (in analoger Weise zu Fig. 3) jeweils durch die Abstände der Targetstrahlen innerhalb der Reihen die Bestrahlung aller Targetstrahlen in weiter hinten angeordneten Reihen ermöglicht,

Fig. 5: eine perspektivische Ansicht einer Mehrkanaldüse mit in zwei Reihen zueinander versetzt angeordneten Kanälen, bei der die Targetstrahlen mit mehreren, zu einer linienförmigen Beleuchtung zusammengefügt Laserstrahlen angeregt werden,

Fig. 6: eine perspektivische Ansicht einer Mehrkanaldüse mit nur einer linearen Anordnung von Targetstrahlen, bei der nebeneinander aufgereihete Laserstrahlen jeweils auf einen Targetstrahl fokussiert sind,

Fig. 7: eine perspektivische Ansicht einer Mehrkanaldüse mit in zwei Reihen zueinander versetzt angeordneten Kanälen, bei der die Targetstrahlen mit einer linienförmigen Beleuchtung eines über eine Zylinderoptik geformten Laserstrahls angeregt werden,

Fig. 8: eine perspektivische Ansicht einer Mehrkanaldüse mit nur einer Reihe von Düsenöffnungen, bei der die linienförmige Anordnung von Targetstrahlen durch Drehung gegenüber der Normalebene 48 zur Anregungsstrahlung (Laserstrahl großen Durchmessers) ohne Lücken den Anregungsfleck ausfüllen.

Die erfindungsgemäße Anordnung besteht in ihrer Grundvariante aus einer Vakuumkammer 1, einem Targetgenerator 2, der über eine Düse 21, die mehrere einzelne Öffnungen 22 aufweist, ein Bündel von parallelen Targetstrahlen 3 erzeugt und einer Anregungsstrahlungsquelle 4, die orthogonal auf die Targetstrahlen 3 fokussiert ist und dort einen Strahlungsfleck 41 über alle Targetstrahlen 3 bildet.



Durch die einzelnen Öffnungen 22 der Düse 21 treten die Targetstrahlen 3 in die Vakuumkammer 1 ein. Dort werden sie durch Beschuss mit energiereicher Anregungsstrahlung aus der Strahlungsquelle 4, die einen Energiestahl 42 (Laser-, Elektronen- oder Ionenstrahl) liefert und alle Targetstrahlen 3 zugleich bestrahlt, in Plasma umgewandelt, wobei das Plasma Licht im interessierenden Spektralbereich, vorzugsweise im extrem ultravioletten (EUV-) Bereich, emittiert.

Die Targetstrahlen 3 sind beim Eintritt in die Vakuumkammer 1 flüssig, können aber im Bereich der Wechselwirkung mit dem Energiestahl 42 flüssig, kontinuierlich (Strahl/Jet) oder diskontinuierlich (Tröpfchenstrom), oder fest (gefroren) sein. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von verflüssigten Gasen, für die EUV-Erzeugung bevorzugt Xenon. Andere mögliche Targetmaterialien sind Metallsalze in wässriger Lösung. Feste Targetstrahlen 3 werden durch entsprechend gekühltes Targetmaterial erzeugt, indem diese bei Eintritt in die Vakuumkammer 1 gefrieren und in diesem Zustand in den Bereich der Wechselwirkung mit dem Energiestahl gebracht werden.

Die Menge an Targetmaterial, die für einen einzelnen Impuls des Energiestahls 42 zur Verfügung steht, und damit die für die EUV-Strahlungserzeugung optimale Einzelimpulsenergie ist bei gleicher Austrittsgeschwindigkeit des Targetmaterials und gleichem Durchmesser der einzelnen Öffnungen 22 gegenüber einer herkömmlichen Einkanaldüse um einen Faktor höher, der der Anzahl der einzelnen Öffnungen 22 der Düse 21 entspricht. Die Anordnung der Öffnungen 22 ist in diesem Beispiel so gewählt, dass die Transmissionsverluste für den einfallenden Energiestahl 42 minimal werden, d.h. dass der gesamte fokussierte Strahlungsfleck 41 vollständig durch die auf Lücke stehenden Targetstrahlen 3 abgedeckt werden. Das kann z.B. dadurch erreicht werden, dass die Einzelöffnungen räumlich versetzt angeordnet sind.

Prinzipiell wird gemäß der Erfindung eine Art „Gießkannendüse“ mit definiert geordneten Öffnungen 22 angewendet. Diese weist jedoch die Besonderheit auf, dass in Richtung des Energiestahls 42 keine Düsenöffnungen 22 hintereinander stehen oder sich wesentlich überlappen. Wegen der Expansion der Durchmesser der Targetstrahlen 3 bei der Umwandlung in Plasma, können in der Projektion des Strahlungsflecks 41 des Energiestahls 42 sogar geringe Lücken zwischen den Targetstrahlen 3 verbleiben.

Fig. 2 zeigt in den Teildarstellungen a bis d vier wesentliche Varianten der Anordnung von Öffnungen 22 der Düse 21.

In Fig. 2a ist in einer Draufsicht ein Muster der Öffnungen 22 als Anordnung von zwei parallelen Reihen 23 dargestellt, die um den halben Abstand der Öffnungen 22 innerhalb jeder Reihe 23 zueinander versetzt sind. Bei drei parallelen Reihen 23 würde sich der Versatz auf ein Drittel des Abstandes der Öffnungen 22 verringern, wie es weiter unten zu Fig. 4 noch ausführlicher beschrieben ist.

In einer anderen Variante gemäß Fig. 2b sind zwei Reihen 23 unter entgegengesetzten Winkeln zur Einfallsrichtung 43 des Energiestrahls 42 angebracht. Dabei haben die beiden Reihen 23 eine Öffnung 22 der Düse 21 gemeinsam, wobei durch diese Öffnung 22 zugleich der Schnittpunkt 24 beider Reihen 23 gegeben ist. Der Winkel gegenüber der Einfallsrichtung 43 des Energiestrahls 42 ist für beide Reihen 23 betragsmäßig gleich und variiert in Abhängigkeit vom Durchmesser der Öffnungen 22 und einer (möglicherweise gewollten) Lückenbildung oder geringen Überlappung der austretenden Targetstrahlen 3 in der Projektion des Strahlungsflecks 41 (wie in Fig. 1 dargestellt). Das sich abzeichnende Muster der Öffnungen 22 entspricht einer V-Form, die einerseits – wie in Fig. 2b gezeigt – mit dem Schnittpunkt 24 der Reihen 23 (d.h. mit der Spitze des V) in Richtung des Energiestrahls 42 oder andererseits entgegen dem einfallenden Energiestahl 42 ausgerichtet sein kann.

Fig. 2c stellt eine Möglichkeit dar, bei der die Öffnungen 22 in nur einer Reihe 23 angeordnet sind. Zur Vermeidung von Lücken zwischen den Targetstrahlen 3 ist die Reihe 23 nach den gleichen Maßgaben, wie oben zu Fig. 2b erläutert, gegenüber der Einfallsrichtung 43 des Energiestrahles 42 um einen Winkel geneigt. Für den Fall, dass Lücken zwischen den Targetstrahlen 3 zulässig oder erwünscht sind (siehe z.B. auch die Ausführungen zu Fig. 6), kann der Winkel sehr groß sein oder exakt  $90^\circ$  betragen. Andernfalls wird der Winkel vorzugsweise im Bereich um  $45^\circ$  zu wählen sein.

Abschließend, aber nicht im Sinne einer Erschöpfung der Möglichkeiten, ist in Fig. 2d eine Kombination der Düsenmuster aus Fig. 2a und Fig. 2b angegeben. Diese Anordnung kann sowohl als hintereinander liegende parallele Reihen 23 mit unterschiedlichen Abständen der Öffnungen 22 beschrieben werden als auch als quer zum Energiestahl 42 fortgesetzte V-Formen aufgefasst werden. Dem Wesen nach wird das Muster aber wohl treffender als quer zur Einfallsrichtung 43 des Energiestrahles 42 orientiertes Zick-Zack-Muster beschrieben. Dabei schneiden sich

zwei gegensätzlich zur Einfallsrichtung 43 des Energiestrahls 42 angeordnete Parallelscharen 25 und 26 von Öffnungen 22, bei denen die Schnittpunkte 24 – wie bereits bei der V-Form beschrieben – mit jeweils einer gemeinsamen Öffnung 22 besetzt sind.

5 Eine mögliche Energieeinkopplung besteht darin, dass die durch die Mehrkanaldüse 21 erzeugten Targetstrahlen 3 durch einen Laser als Energiestrahls 42 so bestrahlt werden, dass der Strahlungsfleck 41, der dem Laserfokus (häufig auch: Lasertaille) entspricht, mindestens so groß ist wie die Breite des gesamten Bündels der Targetstrahlen 3 (in Fig. 3 gezeigt).

10 Für einen solchen Fall zeigt Fig. 4 die Draufsicht auf eine Düse 21 mit drei parallel hintereinander angeordneten Reihen 23 von Öffnungen 22 sowie den auftreffenden, stilisierten Lichtkegel 44 der Lasertaille als fokussierten Teil des Energiestrahls 42.

Wie deutlich zu erkennen, sind die Reihen 23 jeweils um etwa ein Drittel des (einheitlichen) Abstandes der Öffnungen 22 parallel verschoben, ohne dass sich die  
15 daraus ausströmenden Targetstrahlen 3 im Lichtkegel 44 überlappen. Wegen der Expansion der Durchmesser der Targetstrahlen 3 bei Umwandlung in Plasma, können in der Projektion des Strahlungsflecks 41 des Energiestrahls 42 aber auch geringe Lücken zwischen den Targetstrahlen 3 verbleiben. Damit wird gewährleistet, dass alle Targetstrahlen 3 dieselbe Strahlungsleistung des Energiestrahles 42 erhalten und somit  
20 optimal angeregt und in Plasma umgewandelt werden können.

Die Anregung der Targetstrahlen 3 ist streng genommen als quasi-gleichzeitig zu bezeichnen, da in Ausbreitungsrichtung des Energiestrahles 42 faktisch die Targetstrahlen 3 aus den hinteren Reihen 23 der Düsenöffnungen 22 vom Impuls des Energiestrahls 42 später erreicht werden. Das kann aus Sicht der Plasmaerzeugung  
25 jedoch vernachlässigt werden und wird nachfolgend stets als gleichzeitig beschrieben.

Das aus den Targetstrahlen 3 erzeugte Plasma (nicht gezeichnet) verschmilzt infolge der gleichzeitigen Anregung aller Targetstrahlen 3 zu einem ausgedehnten Plasma mit – entsprechend der Anzahl der Targetstrahlen 3 – vervielfachter  
30 Strahlungsleistung im gewünschten Wellenlängenbereich (z.B. EUV-Strahlung), wenn weitere bekannte Faktoren des Energieeintrages (Strahlungsleistung auf die Targetmasse, optimierte Anregung durch geeignete zeitliche Impulsform etc.) für die einzelnen massenlimitierten Targetstrahlen 3 erfüllt sind.

In Fig. 5 wird der Strahlungsfleck 41 für die Plasmaerzeugung im gesamten Bündel der Targetstrahlen 3 durch sogenanntes räumliches Multiplexing erzeugt, bei dem die Anregungsstrahlung mehrere Einzelstrahlen 45 in einer linearen Aneinanderreihung 46 umfasst, die aus mehreren gleichen Lasern oder durch Strahlteilung aus einem oder wenigen Lasern kombiniert werden und zeitlich synchron das Target beschießen. Das hat den Vorteil, dass die Impulsenergie des einzelnen Lasers nicht so hoch zu sein braucht wie im Fall eines Lasers mit großem Durchmesser des fokussierten Strahlungsflecks 41. Im Ergebnis werden die Foki der Einzelstrahlen 45 räumlich übereinander gelegt und bilden eine Art Linienfokus 47.

Andererseits ist das Nebeneinander-Fokussieren von Einzelstrahlen 45 von Lasern auch insofern interessant, dass – entsprechend der Darstellung von Fig. 6 – jeder Targetstrahl 3 von genau einem Einzelstrahl 45 getroffen wird, so dass die lückenlose Anordnung von Targetstrahlen 3 bei Konzipierung der Düse 21 weniger kritisch ist und die Anordnung der Öffnungen 22 in nur einer Reihe erfolgen kann. Das ist insbesondere für solche Anwendungen interessant, bei denen für die resultierende Strahlung auf den Charakter einer Punktlichtquelle nicht verzichtet werden soll. In diesem Fall sollte die Auskopplung der gewünschten Strahlung aus dem Plasma orthogonal zur Richtung der Targetstrahlen 3 und zur Einfallsrichtung 43 der Einzelstrahlen 45 erfolgen. Folglich können, indem die einzelnen Targetstrahlen 3 von jeweils einem Einzelstrahl 45 (eines Lasers) synchron bestrahlt werden, die Transmissionsverluste und damit auch die Einkoppelverluste für eine einzelne Reihe 23 von Öffnungen 22 in der Düse 21 minimiert werden.

Zusätzlich wird die Energieeinkopplung verbessert, indem ein kleinerer Vorimpuls zeitlich vor dem Hauptenergieimpuls auf die Targetstrahlen 3 eingestrahlt wird, so dass ein sogenanntes Vorplasma über die gesamte Breite der zueinander beabstandeten Targetstrahlen 3 „verschmiert“ wird. In dieses Vorplasma kann die Energie des Hauptimpulses sehr effektiv eingekoppelt werden, so dass trotz der Verwendung einzelner Targetstrahlen 3 und einzelner Energiestrahlen 44 die Transmissionsverluste an Anregungsstrahlung minimiert sind und die Strahlungserzeugung aus dem Plasma weitgehend homogen ist.

Wie man aus der Darstellung gemäß Fig. 7 ersieht, ist es ebenfalls möglich und sinnvoll, einen echten Linienfokus 47 für die Bestrahlung der Targetstrahlen 3 einzusetzen. Bei einer Laseranregung lässt sich der Linienfokus 47 z.B. einfach durch eine Zylinderoptik erzeugen: Ein solcher Linienfokus 47 kann insbesondere für

großflächige Bündel von Targetstrahlen 3, die ein großflächiges Plasma zur Folge haben, wesentliche Bedeutung erlangen, wenn die Homogenität des Plasmas für die Strahlungserzeugung wichtig ist, da in dieser Konfiguration ein einheitlicher Energieeintrag in jeden der Targetstrahlen 3 erfolgt.

5

Fig. 8 zeigt noch eine weitere Variante der Anordnung von Targetstrahlen 3 unter Nutzung einer Düse 21 gemäß Fig. 2c, bei der bei einem einzigen Energiestrahls 42 kein Transmissionsverlust an Anregungsstrahlung zu verzeichnen ist. Obwohl lediglich eine einfache Reihe 23 von Öffnungen 22 der Düse 21 vorhanden ist und die Reihe

10 23 zwischen den Öffnungen 22 zwangsläufig Abstände aufweisen muss, wird hier die Lückenlosigkeit des Bündels der Targetstrahlen 3 hergestellt, indem die Reihe 23 der Düsenöffnungen 22 mit der Normalebene 48 des einfallenden Energiestrahls 42 einen Winkel  $\alpha$  einschließt, so dass die an sich zwischen den Öffnungen 22 der Düse 21 vorhandenen Abstände bei der Projektion des Strahlungsfleckes 41 der

15 Anregungsstrahlung auf das so gedrehte Bündel der Targetstrahlen 3 nicht in Erscheinung treten. Damit kann durch die Wahl des Winkels  $\alpha$  der Transmissionsverlust geeignet minimiert bzw. die flächenabhängige Energieeinkopplung maximal eingestellt werden. Außerdem ergibt sich als Zusatzvorteil eine größere Fläche des strahlenden Plasmas auch orthogonal zu den Richtungen von

20 Targetstrahlen 3 und Energiestrahls 42.

Weitere Gestaltungsvarianten der Erfindung (insbesondere bezüglich der Düsenvariationen nach Fig. 2a bis 2d) sind ohne Weiteres möglich, ohne den Rahmen dieser Erfindung zu verlassen. Ausgegangen wurde in den vorhergehend

25 beschriebenen Beispielen von parallelen, lückenlos angeordneten Targetstrahlen 3, die bei Erhaltung der Massenlimitierung relativ große Targetmassen ermöglichen. Darüber hinaus sind aber andere Konfigurationen mit sich kreuzenden oder überlappenden Targetstrahlen oder auch mehreren Bündeln von Targetstrahlen 3 aus unterschiedlich positionierten Düsen nicht erfindungsfremd. Es sind insbesondere

30 solche Düsenformen und Targetanordnungen, die in den Zeichnungen nicht explizit gezeigt oder beschrieben sind, gleichfalls klar als zur erfindungsgemäßen Lehre gehörig zu verstehen, solange sich diese ohne erfinderisches Zutun auf das Prinzip der Vervielfachung der Strahlungsausbeute durch Einsatz einer Mehrzahl von massenlimitierten Targets und deren zeitsynchroner Anregung zurückführen lassen.

## Bezugszeichenliste

	1	Vakuumkammer
5	2	Targetgenerator
	21	Düse
	22	Öffnungen
	23	Reihe
	24	Schnittpunkt
10	25, 26	Parallelscharen
	3	Targetstrahlen
	4	Anregungsstrahlungsquelle
15	41	fokussierter Strahlungsfleck (der Anregungsstrahlung)
	42	Energiestrah
	43	Einfallsrichtung
	44	Lichtkegel
	45	Einzelstrahl (der Anregungsstrahlung)
20	46	lineare Aneinanderreihung (der Einzelstrahlfoki)
	47	Linienfokus
	48	Normalebene (des Energiestrahls)

## Patentansprüche

1. Anordnung zur Erzeugung von intensiver Strahlung auf Basis eines Plasmas, die einen Targetgenerator mit einer Düse zur Dosierung und Ausrichtung eines Targetstroms für die Plasmaerzeugung und eine Vakuumkammer enthält, wobei in der Vakuumkammer eine energiereiche Anregungsstrahlung auf den Targetstrom gerichtet ist und der Targetstrom stückweise mittels einer definierten Impulsenergie der Anregungsstrahlung vollständig in ein Plasma, das eine hohe Konversionseffizienz für die intensive Strahlung in einem gewünschten Wellenlängenbereich aufweist, umgewandelt wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Düse des Targetgenerators eine Mehrkanaldüse mit mehreren separaten Öffnungen ist, wobei die Öffnungen mehrere Targetstrahlen erzeugen, auf die abschnittsweise jeweils gleichzeitig die Anregungsstrahlung zur Plasmaerzeugung gerichtet ist.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Öffnungen der Düse derart angeordnet sind, dass ein von der Anregungsstrahlung auf alle die Düse verlassenden Targetstrahlen fokussierter Strahlungsfleck räumlich im Wesentlichen gleichmäßig mit parallelen Targetstrahlen abgedeckt ist, wobei alle Targetstrahlen über ihren Durchmesser vollständig bestrahlt sind.
3. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Öffnungen der Düse in einer Reihe angeordnet sind.
4. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Öffnungen der Düse so angeordnet sind, dass die Targetstrahlen den Strahlungsfleck der Anregungsstrahlung lückenlos und nicht überlappend ausfüllen, wobei für im Strahlungsfleck benachbart erscheinende Targetstrahlen die Öffnungen der Düse in Richtung der Anregungsstrahlung versetzt angeordnet sind.

5. Anordnung nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Öffnungen der Düse in einer Reihe angeordnet sind, wobei die Reihe der Öffnungen mit der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung einen Winkel zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  einschließt.
6. Anordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Öffnungen der Düse in mehreren Reihen versetzt zueinander angeordnet sind.
7. Anordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Öffnungen als parallele Reihen mit gleichem Abstand der Öffnungen in der Düse vorhanden sind, wobei die Reihen bezüglich der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung hintereinander und um einen Bruchteil des Öffnungsabstandes, der von der Anzahl der hintereinander liegenden Reihen abhängt, zueinander versetzt angeordnet sind.
8. Anordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Öffnungen der Düse in zwei parallelen Reihen angeordnet sind, die orthogonal zur Richtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet und um den halben Öffnungsabstand zueinander versetzt sind.
9. Anordnung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Reihen von Öffnungen einander kreuzen, wobei einander kreuzende Reihen ihre erste oder letzte Öffnung als gemeinsamen Schnittpunkt aufweisen und gegenüber der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung unter dem gleichen Schnittwinkel spiegelsymmetrisch ausgerichtet sind.
10. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass zwei einander schneidende Reihen von Öffnungen V-förmig gegenüber der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet sind.
11. Anordnung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die V-Form mit der Spitze in Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet ist.



12. Anordnung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die V-Form mit der Spitze entgegen der Einfallsrichtung der Anregungsstrahlung ausgerichtet ist.

5

13. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Anregungsstrahlung ein gepulster Energiestrahл vorgesehen ist, wobei der Energiestrahл einen Fokus aufweist, dessen Querschnittsfläche die Breite aller nebeneinander angeordneten Targetstrahlen gleichzeitig überdeckt.

10

14. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл von einem gepulsten Laser erzeugt ist.

15. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Elektronenstrahl, ist.

15

16. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Ionenstrahl, ist.

20

17. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл durch eine geeignete Optik zu einer orthogonal zur Richtung der Targetstrahlen ausgerichteten Fokuslinie auf die Targetstrahlen fokussiert ist.

25

18. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл aus mehreren einzelnen Energiestrahlen zusammengesetzt ist, wobei die Energiestrahlen durch geeignete optische Elemente orthogonal zur Richtung der Targetstrahlen zu einer quasi-kontinuierlichen Fokuslinie aneinandergereiht sind und gleichzeitig auf die Targetstrahlen treffen.

30

19. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahл aus mehreren einzelnen Energiestrahlen zusammengesetzt ist, wobei die einzelnen Energiestrahlen jeweils auf einen Targetstrahl fokussiert sind und alle Targetstrahlen gleichzeitig bestrahlt werden.

20. Anordnung nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der Reihe von einzelnen Energiestrahlen ein Laser mit strahlteilenden optischen Elementen vorgesehen ist.
- 5
21. Anordnung nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung der Reihe von einzelnen Energiestrahlen mehrere synchron betriebene Laser vorgesehen sind.
- 10
22. Anordnung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Energiestrahle hinsichtlich der Effizienz seiner Energieeinkopplung in das Plasma durch Anwendung von Mehrfachimpulsen, insbesondere Doppelimpulsen aus Vor- und Hauptimpuls, optimiert ist.
- 15
23. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die aus den Öffnungen der Mehrkanaldüse bereitgestellten Targetstrahlen im Bereich der Wechselwirkung mit der Anregungsstrahlung kontinuierliche Strahlen sind.
- 20
24. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die aus den Öffnungen der Mehrkanaldüse bereitgestellten Targetstrahlen spätestens im Bereich der Wechselwirkung mit der Anregungsstrahlung in Tropfen zerfallen sind.
- 25
25. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Targetstrahlen Flüssigkeitsstrahlen sind.
26. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Targetstrahlen beim Austritt aus der Düse in die Vakuumkammer gefrierende feste Strahlen sind.
- 30
27. Anordnung nach Anspruch 23, 24, 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Targetstrahlen aus kondensiertem Xenon erzeugt sind.

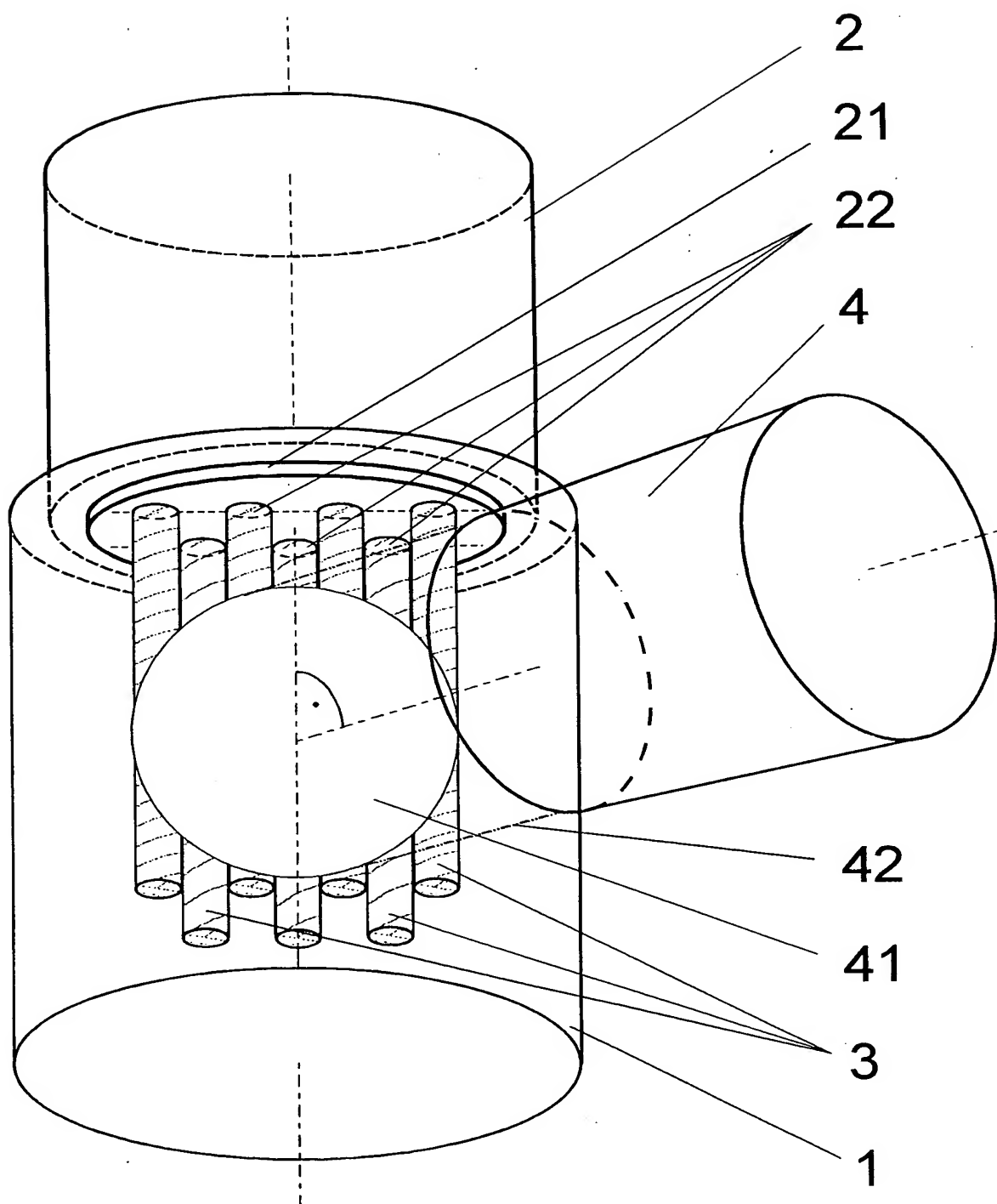
28. Anordnung nach Anspruch 23, 24, 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Targetstrahlen aus wässriger Lösung von Metallsalzen erzeugt sind.

5 29. Verwendung der Anordnung nach Anspruch 1 zur Erzeugung von plasmagenerierter Strahlung in den Wellenlängenbereichen zwischen weicher Röntgenstrahlung und Infrarot-Spektralbereich.

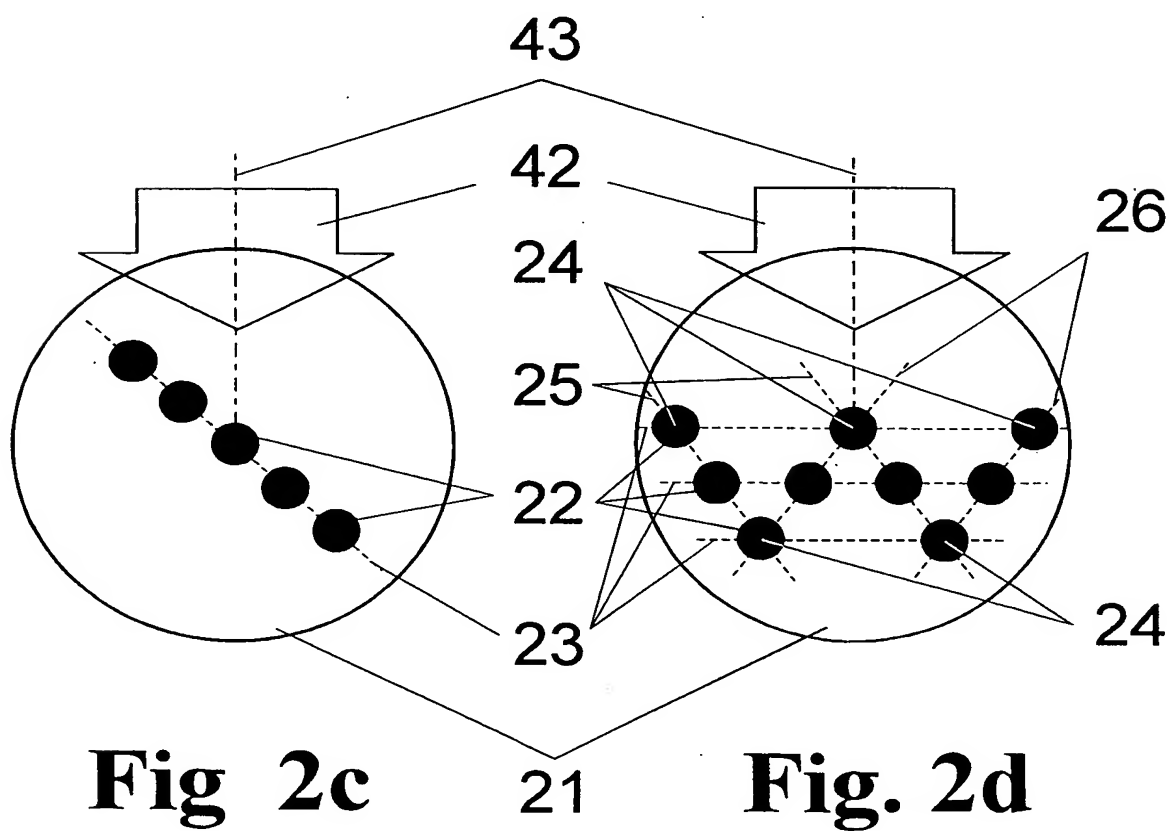
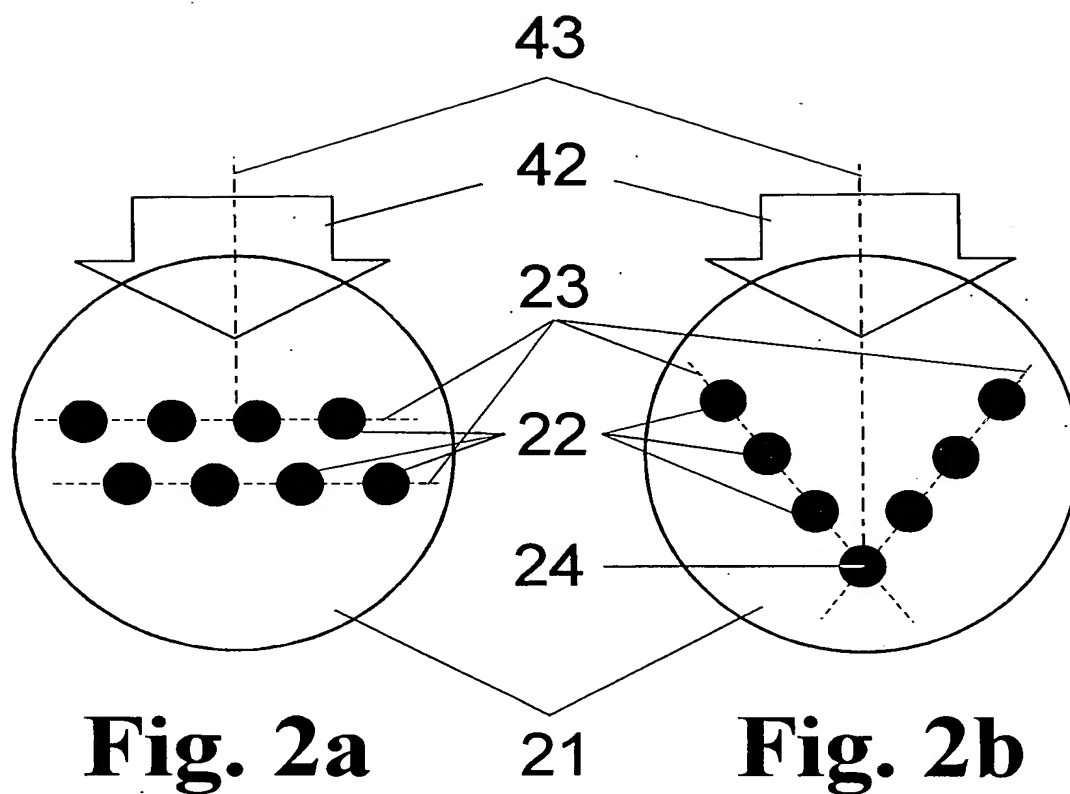
10 30. Verwendung der Anordnung nach Anspruch 1 zur Erzeugung von EUV-Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 1 und 20 nm für Vorrichtungen für die Halbleiter-Lithographie, insbesondere für die EUV-Lithographie im Bereich um 13,5 nm.

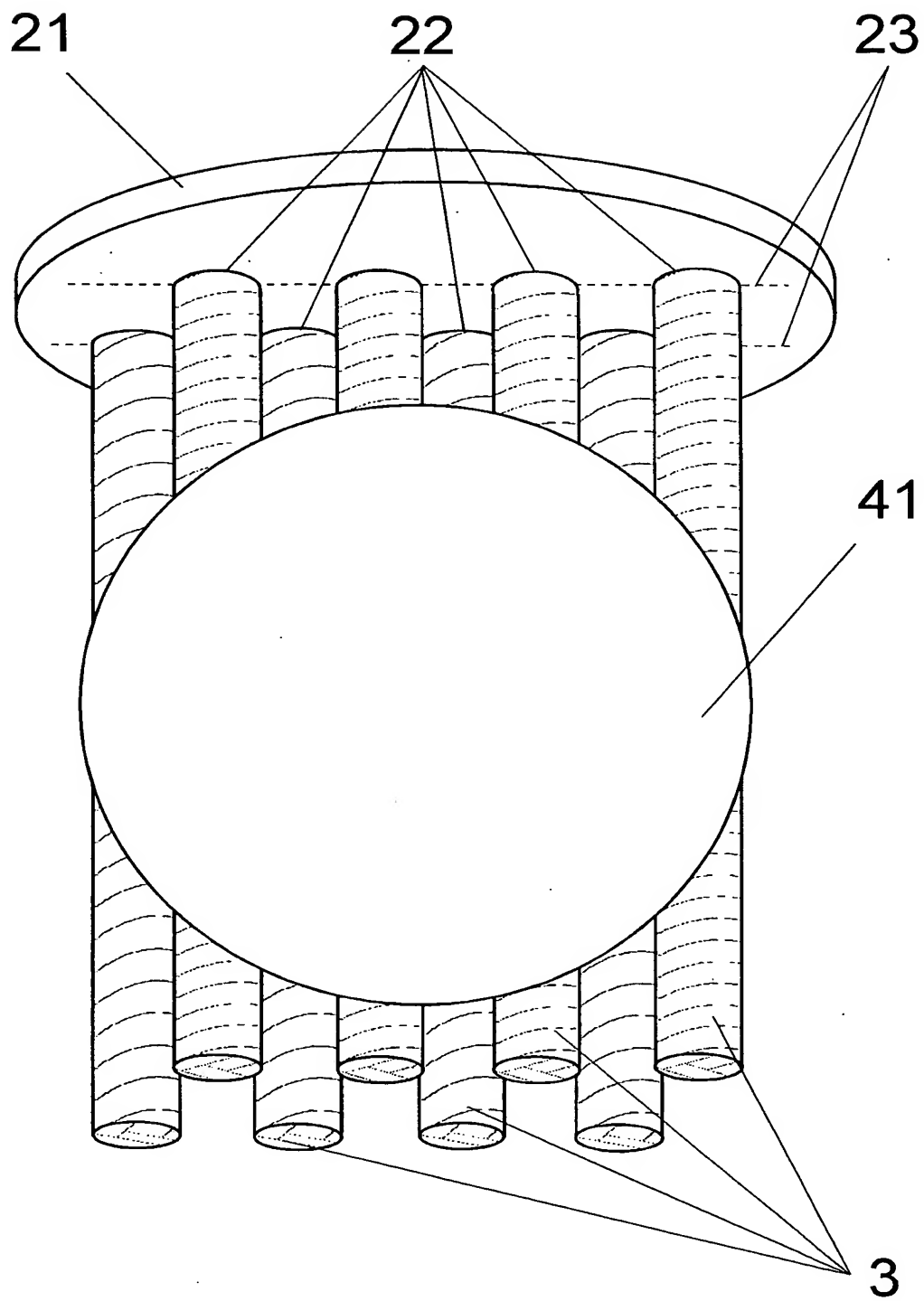
– Hierzu 8 Seiten Zeichnungen –

15

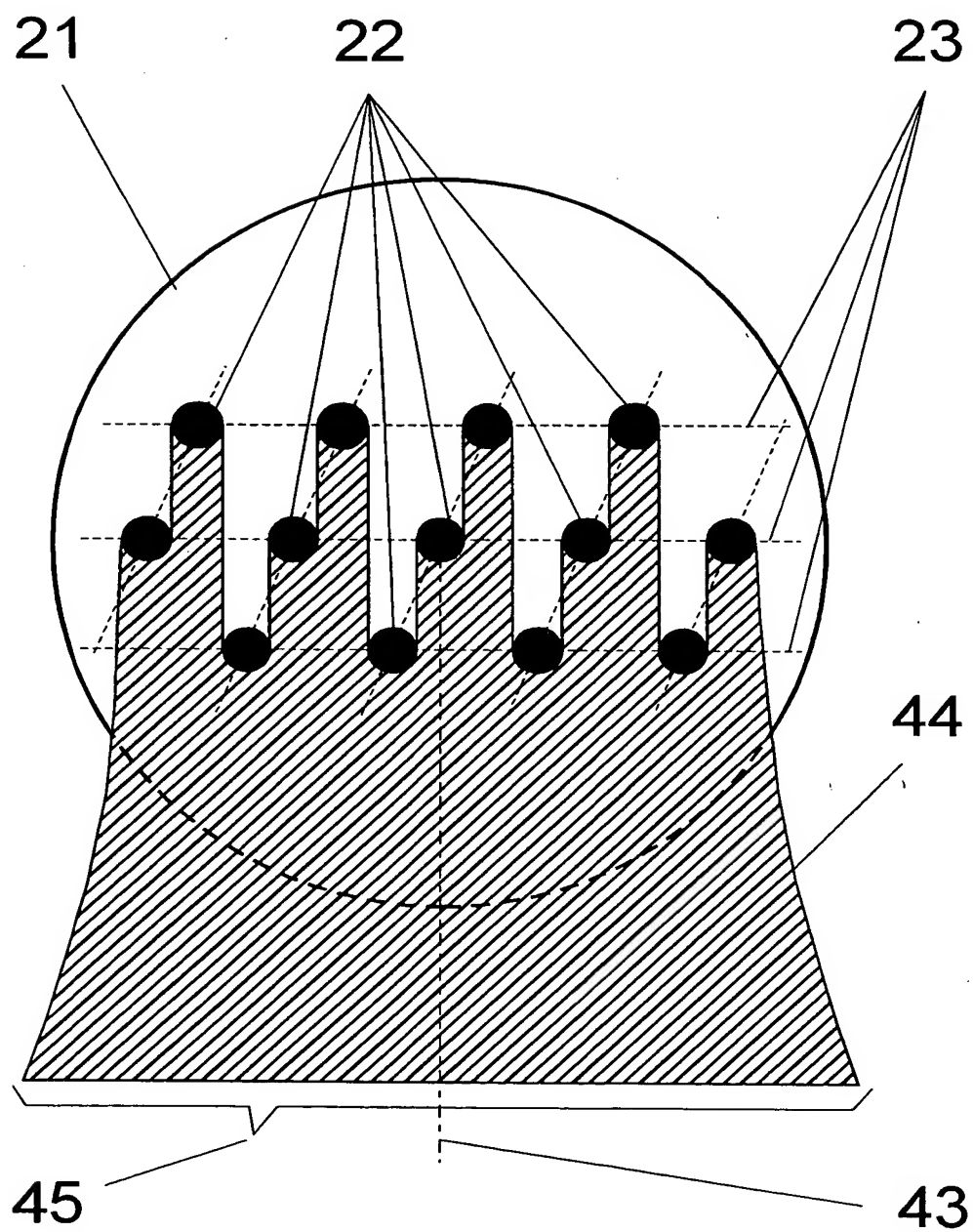


**Fig 1**

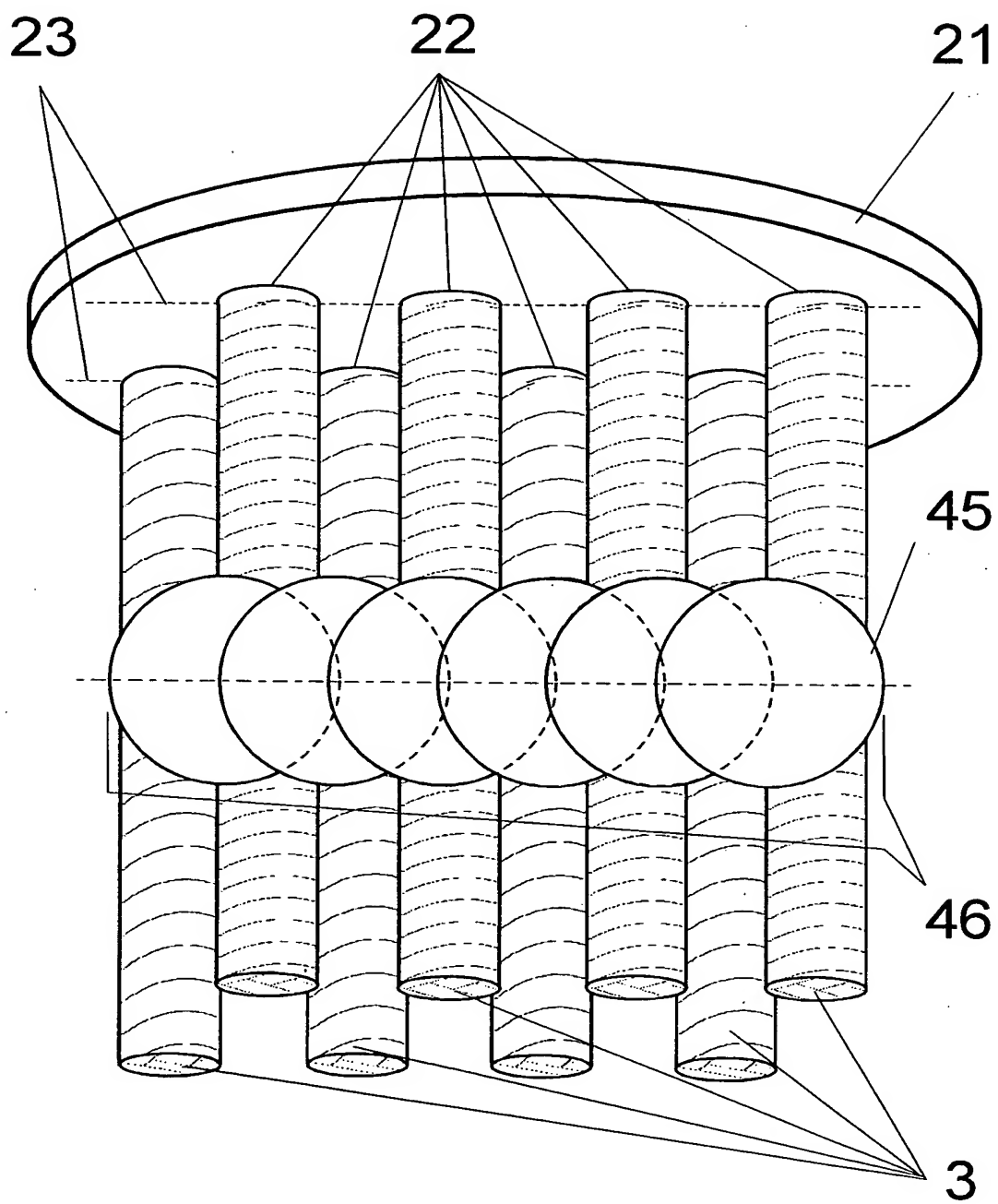




**Fig 3**

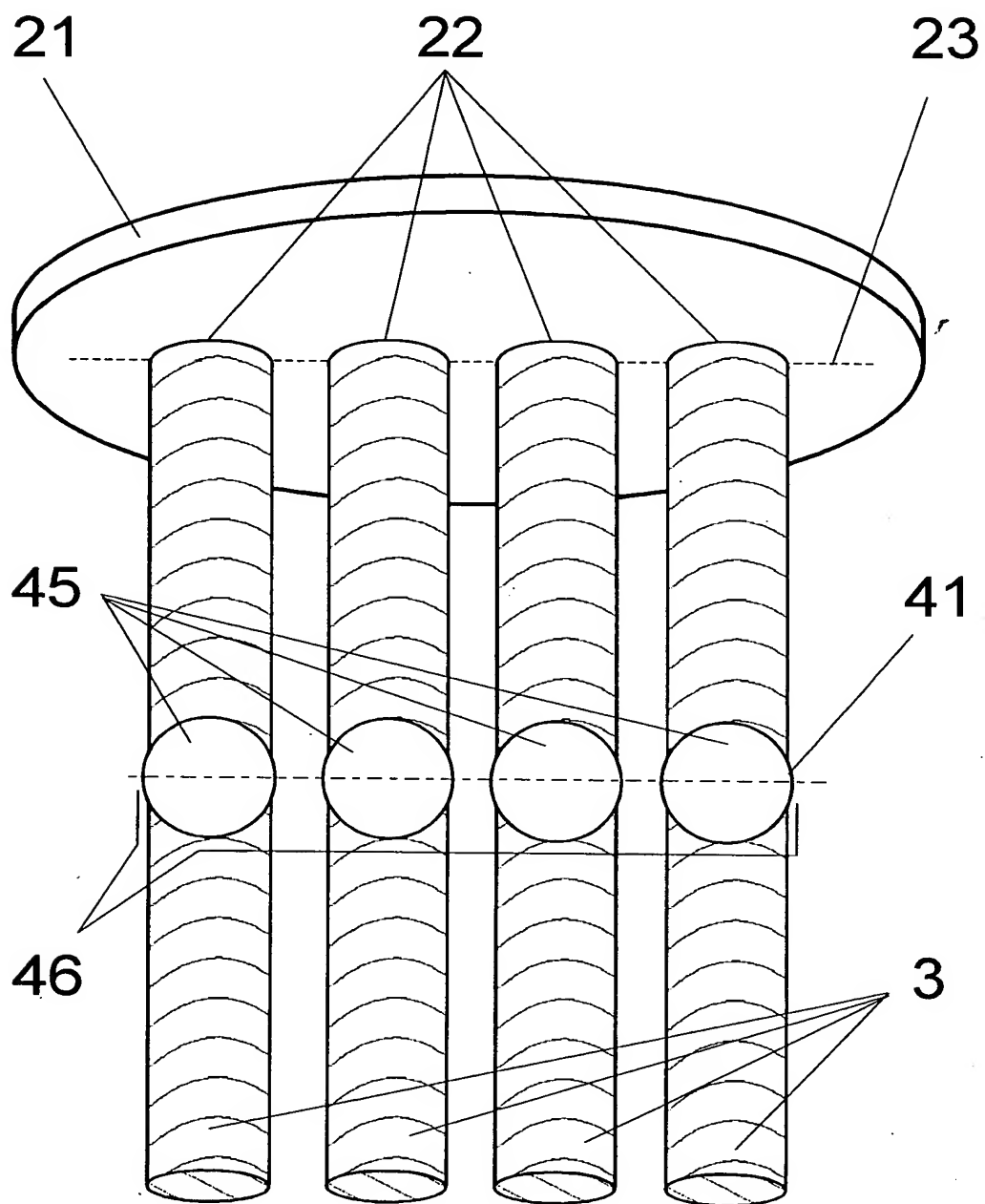


**Fig 4**

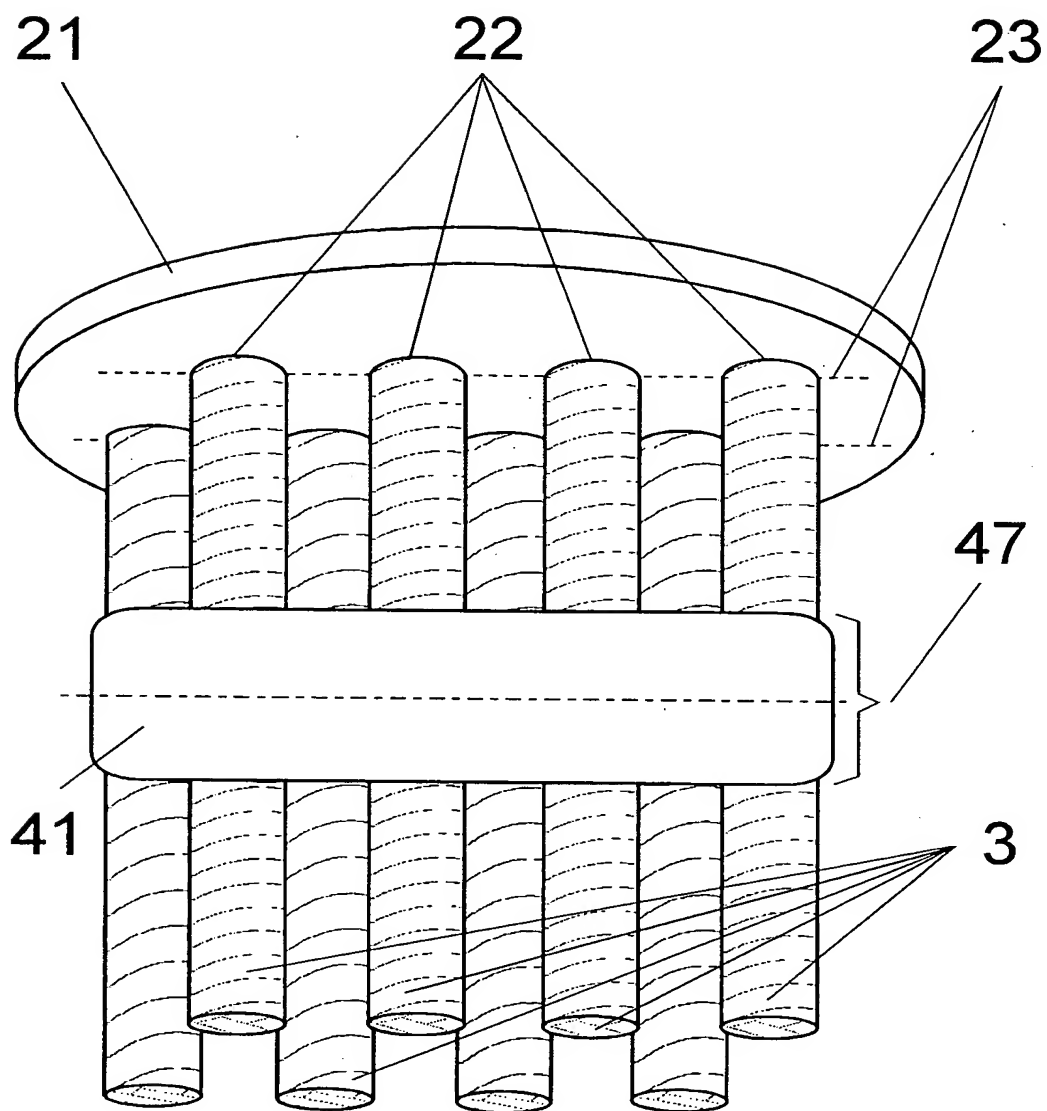


**Fig 5**

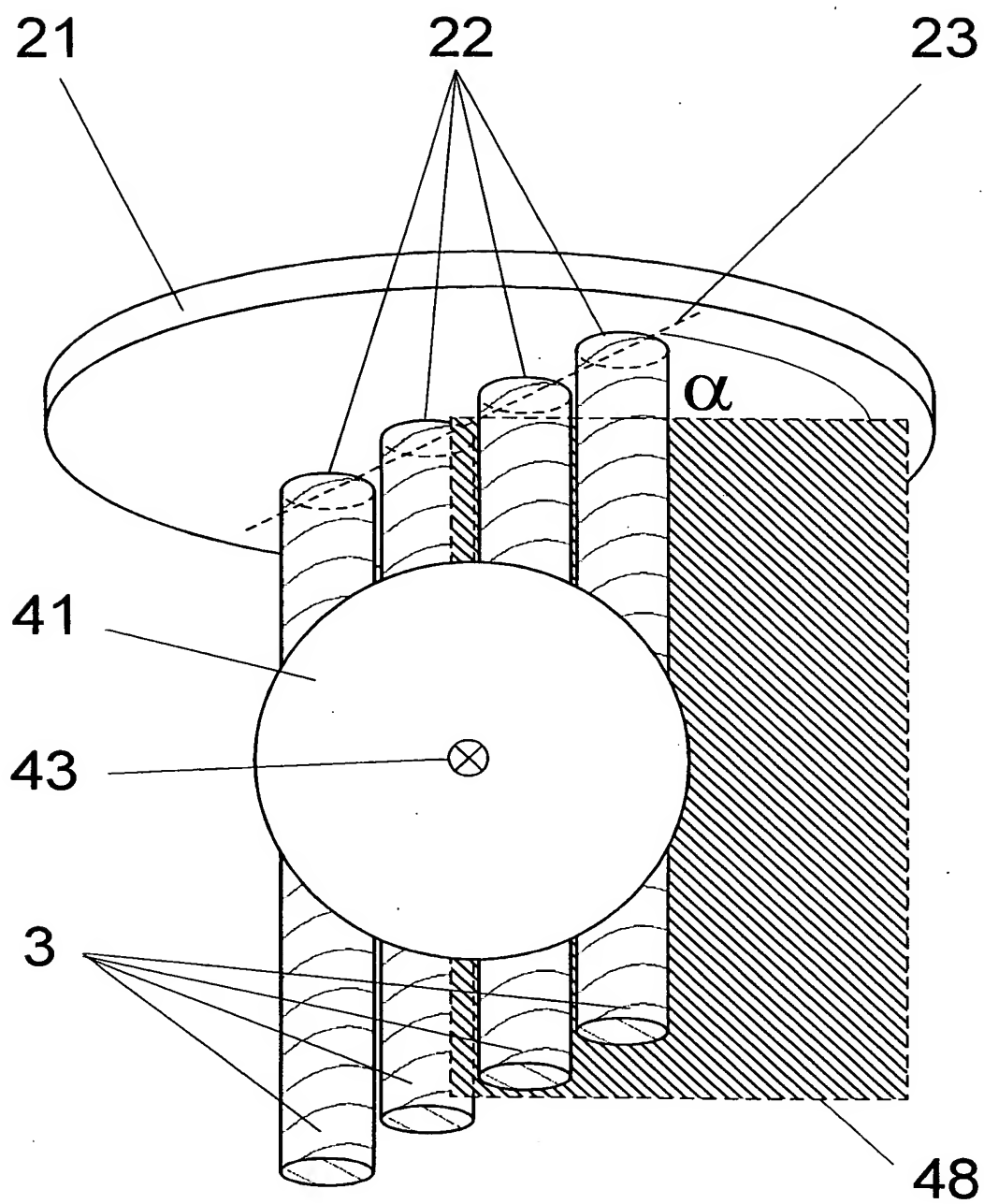




**Fig 6**



**Fig. 7**



**Fig 8**

## Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Erzeugung von intensiver Strahlung auf Basis eines Plasmas, insbesondere kurzwellige Strahlung von weicher Röntgenstrahlung bis extrem ultravioletter (EUV-) Strahlung

Die Aufgabe, eine neue Möglichkeit zur Erzeugung von aus Plasma generierter Strahlung zu finden, bei der unter Beibehaltung der Vorteile der Massenlimitierung der Targets die ins Plasma konvertierte Einzelimpuls-Energie und somit die nutzbare Strahlungsleistung deutlich gesteigert ist, wird erfindungsgemäß gelöst, indem der Targetgenerator (2) eine Mehrkanaldüse (21) mit mehreren separaten Öffnungen (22) aufweist, wobei die Öffnungen (22) mehrere parallele Targetstrahlen (3) erzeugen, auf die abschnittsweise jeweils gleichzeitig die Anregungsstrahlung (42) zur Plasmaerzeugung gerichtet ist.

15

– Fig. 1 –

